



纳米矿物强化微生物光电反硝化: 铁电电子桥效应

张 嘏[†], 陈 桢[†], 任相旭, 刘璐, 任国平^{*}, 周顺桂

福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002

[†]同等贡献

^{*} E-mail: gpren@fafu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-09; 接受日期: 2026-02-25; 网络版发表日期: 2026-06-23

国家自然科学基金面上项目(批准号: 42525702, 42577284)和福建省自然科学基金项目(编号: 2025J09029)资助

摘要 光电反硝化是解决水体硝酸盐污染的绿色高效技术, 凭借其低能耗无污染的优势成为环境治理领域的研究热点. 界面电子传递效率是决定反硝化速率的关键, 对其提升直接关系到技术的应用效果. 然而, 在传统体系中光生载流子易复合、太阳光谱响应范围窄及能量转化路径单一, 致使光能难以被高效转化为化学能, 严重制约了反硝化性能的提升. 针对这一问题, 本研究旨在利用自发极化的铁电体, 在光敏半导体与微生物之间构建高效定向传递的电子桥, 进而强化光生电子的捕获与电子转移效率. 在此, 本文以脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*, *T. denitrificans*)为模式微生物, 鸟粪石(struvite)作为天然铁电材料, 构建了*T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体系. 该体系中, 在CdS与*T. denitrificans*之间构筑一个自发极化电场, 这一电场不仅能快速高效夺取CdS表面的光生电子、抑制载流子复合, 还能通过定向极化作用将电子转移至*T. denitrificans*, 进而实现高效反硝化过程与光能到化学能的高效转化. 综上所述, 本研究提出了铁电材料极化电场介导的界面电子传递新策略, 成功构建高效定向的电子通道, 为环境污染的生物光电化学处理提供了新思路与技术选择.

关键词 铁电材料, 光生载流子分离, 电子传递通道, 废水反硝化

1 引言

水体硝酸盐污染诱发的富营养化(eutrophication)已成为全球亟待解决的重要环境挑战^[1,2]. 在此背景下, 如何高效处理含氮废水, 近年来已成为学界广泛关注的核心课题. 当前废水反硝化研究围绕突破电子供给限制这一核心瓶颈取得系列进展, 主要体现在优化部分亚硝化和厌氧氨氧化(partial nitrification-anammox, PN/A)工艺以构建自主氮循环路径^[3,4], 开发以硫、

铁、氢等无机物为电子供体的自养反硝化(autotrophic denitrification)技术, 以及利用电极生物膜实现直接电子传递^[5]. 然而, 当前研究仍未能突破废水反硝化过程中电子供体匮乏的瓶颈. 无论是Yang等人提出的溶解氧分区调控反硝化工艺^[6], 还是Chen等人开发的一种硫和电极驱动的耦合自养反硝化(sulfur and electrode-driven autotrophic denitrification, SEAD)体系^[7], 亦或是Li等人研发的纳米零价铁还原氧化石墨烯(nZVI-rGO)复合材料^[8]都未能从根本上解决电子来源稀缺、传递

引用格式: 张嘏, 陈桢, 任相旭, 等. 纳米矿物强化微生物光电反硝化: 铁电电子桥效应. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 2032–2044

Zhang S, Chen Z, Ren X X, et al. Nano-mineral enhanced microbial photoelectric denitrification: Ferroelectric electron bridge effect (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 2032–2044, doi: 10.1360/SST-2025-0401

效率低及供应不稳定等根本问题,这使得低碳氮比废水的高效反硝化仍面临严峻挑战。

太阳能驱动的光电效应(photoelectric effect)可直接为废水反硝化提供电子来源,该技术既可避免对外源添加电子供体的依赖^[9],又契合污水处理绿色低碳化的发展需求^[10]。然而,其实际应用仍面临多重关键挑战:在能量利用方面,光生载流子(photogenerated carriers)易复合、太阳光谱响应范围窄及能量转化路径单一,共同导致光能向化学能的转化率偏低^[11];在反硝化性能方面,电子通量供给不足、稳定性差、界面电子传递动力学缓慢,进一步引起反硝化速率缓慢、中间产物积累,最终影响系统的长期运行效能。

针对上述能量利用效率偏低与反硝化效能不佳等问题,引入铁电材料被视为突破当前困境的潜在创新途径^[12]。铁电材料具有自发极化特性,其极化方向可通过施加外电场进行可逆调控,并能形成稳定的内建电场。该电场的存在可高效抑制光生载流子复合、定向引导电子迁移,进而延长电子寿命并显著强化催化效率^[13]。基于铁电材料优异的化学稳定性和独特的电子传输作用优势,本文提出在纳米矿物与微生物之间搭建一个以铁电材料为基础的内建电场,类似“电子桥”,从而实现光生电子在光敏半导体与反硝化菌之间的高效转移。该结果有望降低微生物-光敏半导体界面的电子传递能垒、稳定电子通量供给,并通过优化界面电化学环境增强系统生态稳定性,最终提高反硝化速率、减少中间产物积累,实现更高效的生物反硝化。

在此,本研究旨在利用自发极化的铁电体,在光敏半导体与微生物之间构建可高效定向传递的电子桥,以增强光生电子的捕获与电子转移效率,从而实现高效反硝化(图1(a))。研究选用废水中广泛存在的鸟粪石($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, struvite)作为铁电材料^[14],并以镉离子(Cd^{2+})为前体原位合成硫化镉(CdS)作为光敏半导体材料。进一步将鸟粪石和 CdS 与模式反硝化菌脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*, *T. denitrificans*)结合,构建光电-铁电-生物杂化体系,以期微生物光电自养反硝化技术的性能提升与工程化应用提供模型基础与技术支持。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

反硝化菌*T. denitrificans*购买自德国微生物和细

胞培养物保藏中心(DSMZ)。培养*T. denitrificans*所需的磷酸二氢钾、硝酸钾、氯化铵、五水合硫代硫酸钠、七水合硫酸镁、碳酸氢钠矿物元素等药品,鸟粪石,原位合成光敏半导体硫化镉所需的氯化镉、半胱氨酸均购买自阿拉丁化学试剂公司。辅酶II NADP(H)含量试剂盒购买自上海碧云天生物技术有限公司。实验中使用的照射强度为 0.169 mW cm^{-2} (垂直固定距离为4.8 cm,通过光功率密度仪在反应体系中测定的)的紫色灯带($(395 \pm 5) \text{ nm}$)采购自淘宝。

2.2 光电-铁电生物杂化体的制备

根据文献配制*T. denitrificans*异养培养基和无机自养培养基^[15]。培养基通入高纯氮气(99.999%)曝气除氧1 h,经厌氧密封后进行高压灭菌,待培养基冷却至室温后,接种*T. denitrificans*,于30℃恒温培养箱中培养。菌体达到指数生长阶段时($\text{OD} = 0.277$),添加氯化镉(100 mM)、半胱氨酸(10 g/100 mL),继续在30℃恒温摇床中培养7天。随后添加鸟粪石,30℃摇床中培养12 h。培养结束后,将混合液在 7000 r min^{-1} 下离心7 min,收集生物杂化体沉淀,用0.9% NaCl溶液重复洗涤三次,以去除残留的培养基。将洗涤后的杂化体沉淀转移至50 mL血清瓶中(含有25 mL无机自养培养基)。经暗反应一天以消耗残余电子供体和胞内还原力后,将含有生物杂化体的血清瓶置于紫色灯带下,最终构建光电-铁电-生物杂化反硝化体系。

2.3 杂化体的测试与表征

使用配备有能量色散X射线光谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)的FEI TalosF200x透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM, Thermo Fisher Scientific)对生物杂化体进行形貌观察及其元素组成分析^[16];使用Bruker Multimode 8压电原子力显微镜(piezoelectric force microscope, PFM, Bruker Corporation)测量杂化体表面电势、形貌、蝴蝶曲线和相位反转性;使用X射线光电子能谱仪(X-ray photoelectron spectrometer, XPS, Thermo Scientific K-Alpha)和傅立叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR, Nicolet iS20)分析*T. denitrificans*菌中的官能团和化学键^[17];利用德国ACIX TF2000E铁电分析仪(AixACCT Systems GmbH)测量电滞回线,以验证鸟粪石的铁电性。采用英国Edinburgh公司的瞬态荧光

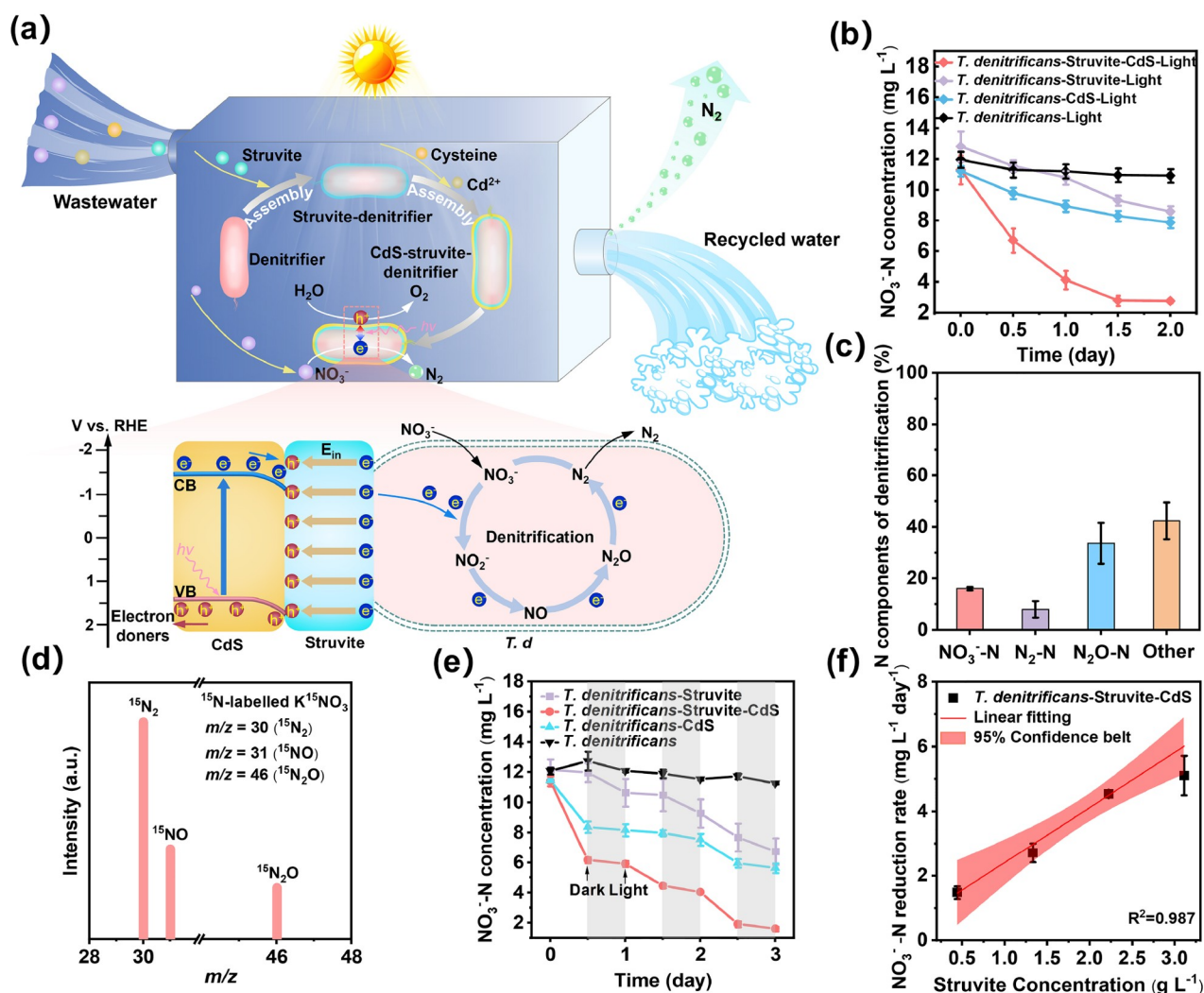


图 1 (网络版彩图)铁电强化的光电反硝化性能。(a) 铁电强化的光电反硝化示意图;(b) 光照下的反硝化效果图;(c) 反硝化的产物分析;(d) 同位素 ^{15}N 标记实验;(e) 光暗交替下的反硝化效果图;(f) 不同浓度鸟粪石对光电反硝化的影响

Figure 1 (Color online) Ferroelectric enhanced photoelectric denitrification performance. (a) Schematic diagram of ferroelectric enhanced photoelectric denitrification; (b) denitrification effect under illumination; (c) analysis of denitrification products; (d) isotope ^{15}N labeling experiment; (e) denitrification effect under alternating light and dark conditions; (f) effects of different concentrations of struvite on photoelectrochemical denitrification.

光谱仪(fluorescence spectrophotometer, FL, FLS1000)测量荧光衰减寿命。采用日本Rigaku公司的X射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD, SmartLab SE)测试鸟粪石和CdS的晶体结构^[18]。为评估*T. denitrificans*杂化体的光电流电性能,采用上海辰华仪器有限公司的电化学工作站(CHI760E)对杂化体的电学性能进行测试。测试时,以0.1 M的PBS为缓冲液,在电学性能测试中,电流-时间(*I-t*)曲线的初始电位设置为0.7 V,循环伏安(cyclic voltammetry, CV)曲线、线性扫描伏安

(linear sweep voltammetry, LSV)曲线测试范围均设置为 ± 1 V。

2.4 光电-铁电生物杂化体的反硝化产物分析

以 ^{15}N 同位素标记的硝酸钾作为反硝化底物,使用美国Agilent公司的三重四级杆气质联用仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS, 8890-7000E)对气态反硝化产物进行同位素示踪分析。此外,通过日本Shimadzu公司紫外-可见分光光度计(ultraviolet

let-visible, UV-Vis, UV-9600)监测硝酸根离子(NO_3^-)和铵根离子(NH_4^+)的浓度变化. 使用美国Agilent公司气相色谱仪(Agilent 7890)测定氧化亚氮(N_2O)和氮气(N_2)的生成量^[19].

2.5 转录组学分析

通过琼脂糖电泳和Agilent 2100检测RNA质量. 再以Total RNA起始, 经去rRNA、打断mRNA、合成cDNA等步骤构建文库, 质检合格(有效浓度 ≥ 1.5 nM)后, Pooling进行Illumina 150 bp配对末端测序(边合成边测序). 测序原始数据过滤得Clean data, 后续用Bowtie2作参考序列比对, HTSeq结合FPKM定量基因表达. 有生物重复样品用DESeq2(调整后 $P < 0.05$)、无重复用edgeR($q < 0.005$ 且 $|\log_2\text{Foldchange}| > 1$)分析差异基因, 最后通过GOseq和KOBAS分别开展基因本体论(gene ontology, GO)、京都基因与基因组百科全书(Kyoto encyclopedia of genes and genomes, KEGG)富集分析(校正 $P < 0.05$ 为显著富集).

3 结果与讨论

3.1 铁电强化生物反硝化性能

本研究选择*T. denitrificans*作为模式菌株, 在其表面原位合成CdS作为光敏半导体材料, 并外源添加铁电材料鸟粪石, 构建光电-铁电-生物杂化体系(图1(a)). 该体系在光照条件下的样品作为实验组(*T. denitrificans*-struvite-CdS-light). 为系统评估各组分作用, 设置三组对照: 不含CdS组(*T. denitrificans*-struvite-light)、不含struvite组(*T. denitrificans*-CdS-light)以及纯菌组(*T. denitrificans*-light)(图1(b)). 结果显示, 实验组的硝酸盐还原速率达到 $0.237 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 分别为纯菌空白对照组($0.028 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)、CdS组($0.081 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)、鸟粪石组($0.097 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)的8.4倍、2.9倍和2.4倍. 其中, 纯菌组观察到微量硝酸盐还原, 可能源于菌体内细胞色素c的光电特性^[20]. 为进一步证实铁电强化的光电反硝化过程, 对实验组中氮元素转化产物进行分析. 结果显示, 体系中的硝态氮含量降低至16%, 而气态产物氮气(N_2 -N)与氧化亚氮(N_2O -N)占比分别上升至7.99%和33.6%(图1(c)), 表明鸟粪石的添加可促进反硝化过程. 此外, 通过 ^{15}N 同位素标记实验, 在 $m/z = 30$ ($^{15}\text{N}_2$)、31(^{15}NO)和46($^{15}\text{N}_2\text{O}$)的位置观察到了 N_2 , NO

和 N_2O 的质谱峰(图1(d)), 进一步证实了光电反硝化过程的进行.

平均量子产率(quantum yield, QY)定义为用于氮气生成的有效电子与总输入光子通量的比率, 计算公式如下^[21]:

$$\text{QY}(\%) = \frac{6.02 \times 10^{23} [10C(\text{N}_2) + 8C(\text{N}_2\text{O})] V h c}{P_{\text{light}} A t \lambda} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 $C(\text{N}_2)$ 是产物 N_2 的浓度, 为 $5.08 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ (三元杂化体), $C(\text{N}_2\text{O})$ 是产物 N_2O 的浓度, 为 $2.31 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ (三元杂化体), 10为1 mol的 NO_3^- 全部还原为 N_2 所需的电子数比例, 8为1 mol的 NO_3^- 全部还原为 N_2O 所需的电子数比例, V 是顶空体积, 为0.095 L, P_{light} 是光强, 为 $0.169 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$, A 是照射面积, 为 7.07 cm^2 , t 是反应时间, 为259200 s, λ 是光波长, 为395 nm, h 是普朗克常数, 为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$, c 是真空中光速, 为 $3 \times 10^{17} \text{ nm s}^{-1}$, 可以得出三元杂化体的量子产率为2.2%; 同理, 二元杂化体产 N_2 的浓度为 $2.57 \times 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$, 产 N_2O 的浓度为 $7.29 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$, 其量子产率为0.6%. 结果表明, 三元杂化体的量子产率是二元杂化体的3.83倍, 进一步验证了该实验方法的可靠性, 同时凸显了三元杂化体在微生物光电反硝化应用中的潜力.

为期3天, 12 h光/12 h暗的交替实验中, 光电-铁电-生物杂化体表现出显著优于三组对照体系的光电反硝化性能, 其在前12 h光照条件下的硝酸盐还原速率为 $0.436 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, 是黑暗时间段还原速率($0.022 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)的19.8倍(图1(e)), 表明鸟粪石的引入可有效增强体系的光电反硝化性能. 黑暗时间段所观察到的微弱硝酸盐还原现象, 可归因于光照时间产生并累积的还原物质缓慢释放^[15]. 进一步开展的梯度鸟粪石浓度实验显示, 体系的光电反硝化性能随着鸟粪石投加量的增加而逐渐提升, 且二者呈线性正相关关系($R^2 = 0.987$)(图1(f)). 这暗示鸟粪石的存在是强化光电反硝化的关键物质.

3.2 铁电调控的转录组学分析

为深入解析鸟粪石对光电反硝化过程的细胞生物学强化机制, 本研究采用转录组学方法, 比较了有/无鸟粪石条件下, *T. denitrificans*在电子传递、能量转换

和反硝化途径等方面的基因表达差异。主成分分析 (principal component analysis, PCA) 结果显示, 两组样本的PCA图中呈现明显分离, 无重叠区域, PC1和PC2累计贡献率达86.2%, 表明鸟粪石的引入引起了菌体整体转录水平的显著改变(图2(a)). 火山图分析进一步识别出4367个表达基因($|\log_2FC| \geq 0$, $p < 0.05$), 其中1392个基因上调、1395个基因下调(图2(b)). 以上结果表明, 鸟粪石的引入导致 *T. denitrificans* 的基因表达发生剧烈变化。

根据转录组数据(图2(c)), 光电-铁电-生物实验组中的细胞色素c和氢酶c的编码基因转录水平显著上升 ($p < 0.01$), 表明鸟粪石的添加诱导了更多的光生电子从胞外传递至胞内。图2(d)所示的铁电强化光电协同反硝化体系中, 光激发电材料生成光生电子在铁电效应的内建电场(E_{in})调控下作为电子供体提供电子, 该电子经细菌细胞膜电子传递链传导后, 通过跨膜转运蛋白的介导与胞内反硝化酶系协同催化, 推动硝酸盐逐步发生反硝化还原(最终生成氮气), 同时偶联ATP

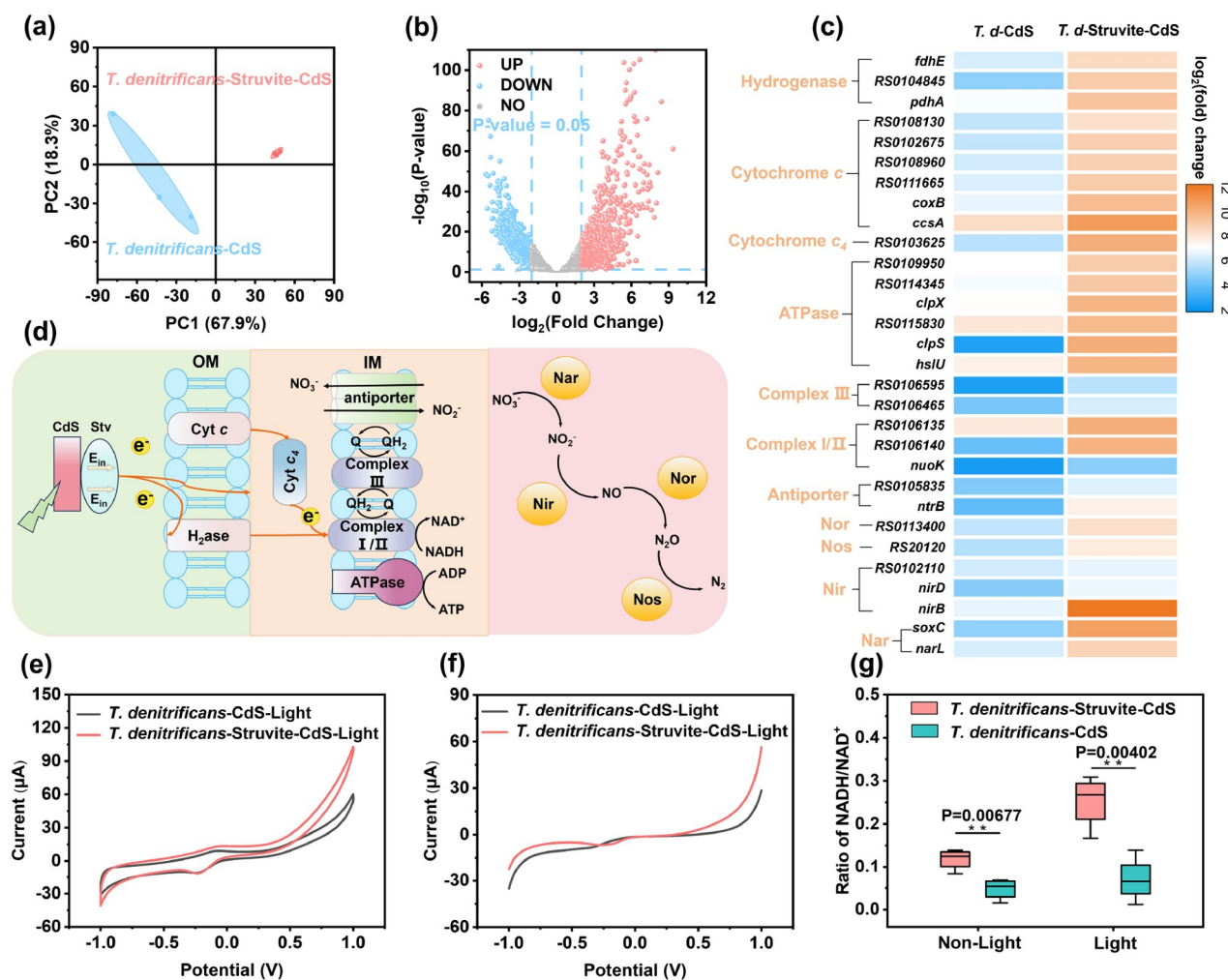


图 2 (网络版彩图)鸟粪石的铁电性强化 *T. denitrificans* 光电反硝化过程的转录组分析. (a) 主成分分析图; (b) 有无鸟粪石添加条件下的差异表达基因火山图; (c) 电子传递、能量转化和反硝化基因表达热图; (d) 铁电强化的光电反硝化机理图, E_{in} : 内建电场, Stv: struvite; (e) CV 曲线; (f) LSV 曲线; (g) 有/无光照条件下有/无鸟粪石体系的 NADH/NAD^+ 比值

Figure 2 (Color online) Transcriptome analysis of ferroelectric enhancing photoelectric denitrification by struvite in *T. denitrificans*. (a) Principal component analysis plot with/without added struvite; (b) volcano plot of differentially expressed genes with/without added struvite; (c) schematic illustration of the mechanism for heat mapping of electron transfer, energy conversion and denitrification gene expression; (d) mechanism diagram of ferroelectric enhanced photoelectric denitrification, E_{in} : built-in electric field, Stv: struvite; (e) CV curve; (f) LSV curve; (g) the NADH/NAD^+ ratio in the system with/without struvite under light/no light conditions.

的生物合成, 完整揭示了此体系的反硝化代谢机制. CV测试结果进一步证实该结论, 即实验组的电容显著高于对照组的, 且在 -0.15 V 的中点电位处出现更明显的氧化还原峰(图2(e)), 表明鸟粪石的添加增强了杂化体系的氧化还原能力. 这一结果可能归因于铁电材料所构建的内建电场促进了光敏半导体与微生物之间的电子传递^[22,23], 从而诱导微生物获得更多胞外光生电子. LSV则进一步验证铁电材料对光生电子传递的强化作用. 如图2(f)所示, 实验组的电流响应随电位升高迅速增强, 极限电流(I_{limit})达 $55.7\text{ }\mu\text{A}$, 远高于对照组的 $28.5\text{ }\mu\text{A}$, 表明鸟粪石的加入提高了细胞色素等电子传递载体与表面CdS之间的界面电子耦合, 形成了更高效的电子传递通道, 从而显著提升电子转移速率和转移量.

随后, 电子转移至还原型辅酶(nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)脱氢酶复合物(复合物I/II), 并经由泛醌等细胞组分完成电子的初级转化. 其中, *nuoK*基因表达上调约2.39倍($p < 0.01$), 支持了这一结论. NADH/NAD⁺定量结果进一步证实, 添加鸟粪石的实验组中NADH/NAD⁺比值为 0.25 ± 0.05 , 远高于未添加鸟粪石的对照组(0.18 ± 0.04)(图2(g)). 这些结果表明, 鸟粪石的添加显著增强了*T. denitrificans*菌体内的还原力水平, 促使NADH积累, 进而为反硝化代谢提供了充足的电子源. 同时, 这一过程为ATP合成提供了质子驱动力. ATP分子中高能磷酸键水解时释放的自由能被用于*T. denitrificans*的反硝化过程($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$), 其中反硝化相关基因*nar*, *nir*, *nor*和*nos*的表达分别上调了2.46~3.05倍、2.74~2.95倍、1.58倍和2.44倍. 这些结果从细胞水平证实, 鸟粪石通过增强电子输入与能量供给, 强化了反硝化过程的基因表达与代谢网络.

3.3 光电-铁电-生物杂化体的结构解析

为系统解析光电-铁电-生物杂化体的微观结构与元素组成, 对四组样品进行了宏观与显微结构表征. 如图3(a)所示, 光电-铁电-生物杂化体中含有大量的亮黄色悬浮颗粒. 扫描电子显微镜图像显示, 在杂化体中, *T. denitrificans*表面覆盖一层致密的纳米颗粒(图3(b)). 为明确纳米颗粒的化学组成与结构, 进一步采用透射电子显微镜和X射线能量色散谱进行分析. 结果显示,

纳米颗粒紧密附着于菌体表面(图3(c)), 其主要组成元素为Mg, N, P, O, Cd和S, 且这六种元素的空间分布高度重合. 该元素组成分别对应于鸟粪石(Mg, N, P, O)与硫化镉(Cd, S)的特征元素, 证实菌体表面成功负载这两种材料.

为验证纳米颗粒的晶体结构, 收集培养基中的固体颗粒对其离心和冷冻干燥, 并进行XRD分析. 结果显示, 光电-铁电-生物杂化体样品中同时出现鸟粪石(PDF#77-2303)和CdS(PDF#77-2306)的矿物特征衍射峰^[15,24], 而不含CdS的对照组仅显示鸟粪石特征衍射峰, 不含鸟粪石对照组仅显示CdS特征衍射峰(图3(d)). 而纯*T. denitrificans*组则呈现弥散宽峰, 无明显结晶衍射峰, 符合生物样品的典型特征. 以上结果证实, 菌体表面所观察到的纳米颗粒为鸟粪石和CdS的结合体, 进一步支持杂化体的成功构建.

采用FT-IR对杂化体的官能团及分子间作用力进行分析. 谱图中可观察到若干特征吸收峰. 其中, 在 466 、 572 和 1006 cm^{-1} 处的振动峰归属于磷酸基团^[25]; 760 和 887 cm^{-1} 处的特征峰分别与鸟粪石中的水-水和氨-水氢键有关^[25], 1440 cm^{-1} 处的峰则对应于 NH_4^+ 的振动模式(图3(e))^[26]. 该结果进一步证实杂化体中存在鸟粪石, 与XRD, TEM结果一致. 拉曼光谱测试结果同样支持上述结论. 杂化体在 950 cm^{-1} (PO_4^{3-})和 1453 cm^{-1} (NH_4^+)处有明显的鸟粪石特征拉曼峰^[27], 表明其具有典型的鸟粪石晶体结构(图3(f)). 同时在 302 cm^{-1} 附近观察到Cd-S键的晶格伸缩振动峰^[28], 证实杂化体中CdS的存在. XPS全谱结果显示, 光电-铁电-生物杂化体的谱图是*T. denitrificans*-struvite和*T. denitrificans*-CdS两组分的叠加(图3(g)). XPS精细谱图中识别到Mg 1s峰(304.47 eV)(图3(h)), 对应于鸟粪石中的Mg-O键^[25]. 在 134.33 和 133.37 eV 处分别出现鸟粪石中的P-OH和P=O特征峰(图3(i))^[25]. 在 404.82 和 161.23 eV 处的特征峰则分别对应硫化镉的Cd $3d_{5/2}$ 和S 2p的结合能(图3(j)和(k))^[29]. XPS, FT-IR和XRD的物相及价键分析结果证实CdS、鸟粪石与微生物在样品中共存, 且存在明显的界面相互作用. 透射电子显微镜观测结果进一步直观显示, CdS与鸟粪石紧密附着于微生物细胞膜表面, 证实二者在微生物表面形成紧密杂化体结构. 这种紧密的结构有利于促进光生电子在界面的高效分离和传递^[30,31].

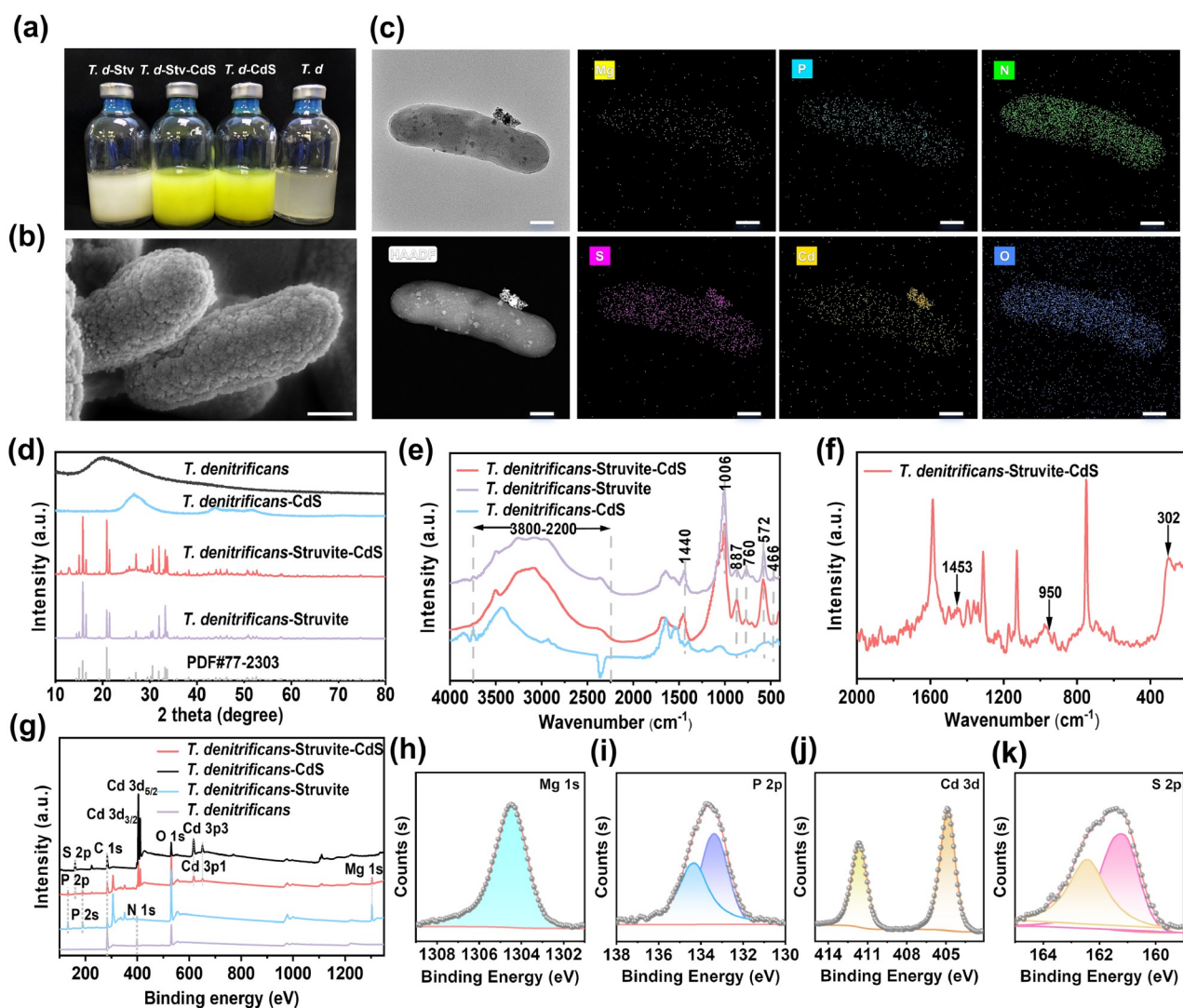


图 3 (网络版彩图)光电-铁电-生物杂化体的构建与表征分析. (a) 光电-铁电-生物杂化体的样品实物图, Stv: struvite; (b) *T. denitrificans*-struvite-CdS的扫描电子显微镜图(比例尺为200 nm); (c) *T. denitrificans*-struvite-CdS的透射电镜图、HAADF暗场图和EDS元素分布图(比例尺为200 nm); (d) X射线衍射图(其中鸟粪石和硫化镉的标准卡片分别为PDF#77-2303和PDF#77-2306); (e) 傅里叶变换红外光谱图; (f) *T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的拉曼图; (g) X射线光电子能谱图; *T. denitrificans*-struvite-CdS的Mg 1s (h), P 2p (i), Cd 3d (j)和S 2p (k)的XPS图

Figure 3 (Color online) Construction and characterization analysis of photoelectric-ferroelectric-biological hybrid system. (a) Photograph of the sample of photoelectric-ferroelectric-biological hybrid system, Stv: struvite; (b) scanning electron microscope image of *T. denitrificans*-struvite-CdS (scale bar: 200 nm); (c) transmission electron microscope image, HAADF dark field image and EDS element distribution map of *T. denitrificans*-struvite-CdS (scale bar: 200 nm); (d) X-ray diffraction diagram (where the standard card of struvite and CdS are PDF#77-2303 and PDF#77-2306, respectively); (e) Fourier transform infrared spectrogram; (f) Raman diagram of *T. denitrificans*-struvite-CdS hybrid system; (g) X-ray photoelectron spectroscopy diagram; XPS diagrams of Mg 1s (h), P 2p (i), Cd 3d (j) and S 2p (k) of *T. denitrificans*-struvite-CdS.

3.4 基于鸟粪石的铁电电子桥形成机制解析

在完成对光电-铁电-生物杂化体的结构解析后,进一步采用光电和铁电表征方法研究体系中的电子转移特性与铁电电子桥形成机制. 通过电流-时间测试评

估体系的光生电子转移性能(图4(a)). 结果显示, *T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的光电流强度最高可达21.85 μA , 远高于*T. denitrificans*-CdS对照组(10.64 μA),表明鸟粪石有效抑制了杂化体光生电子与空穴的复合,实现了更高效的电荷分离,从而降低能量损耗^[32];

同时也说明电子在杂化体内部迁移阻力小, 能够快速跨越界面形成稳定电流^[33]. 在转入黑暗阶段后, *T. denitrificans*-struvite-CdS 光电流下降缓慢, 反映出鸟粪石的引入延长了光生电子寿命, 增强了体系的电荷存储能力与界面电荷转移的持续性^[34]. 纯 *T. denitrificans* 对照组和 *T. denitrificans*-struvite 对照组仅产生微弱的光

电流, 且光开关响应不明显, 表明菌体自身光生电子传递能力有限. 这种微弱的光电流特性源于细胞本身含有丰富的光敏蛋白, 如细胞色素 *c* 等^[20,35]. 鸟粪石浓度梯度实验进一步证实了铁电组分的引入对光生电子产量的调控作用. 从图4(b)可知, 随着鸟粪石投加量的增加, 光电流由 9.4 μA 提升至 32.9 μA , 且二者呈良好的

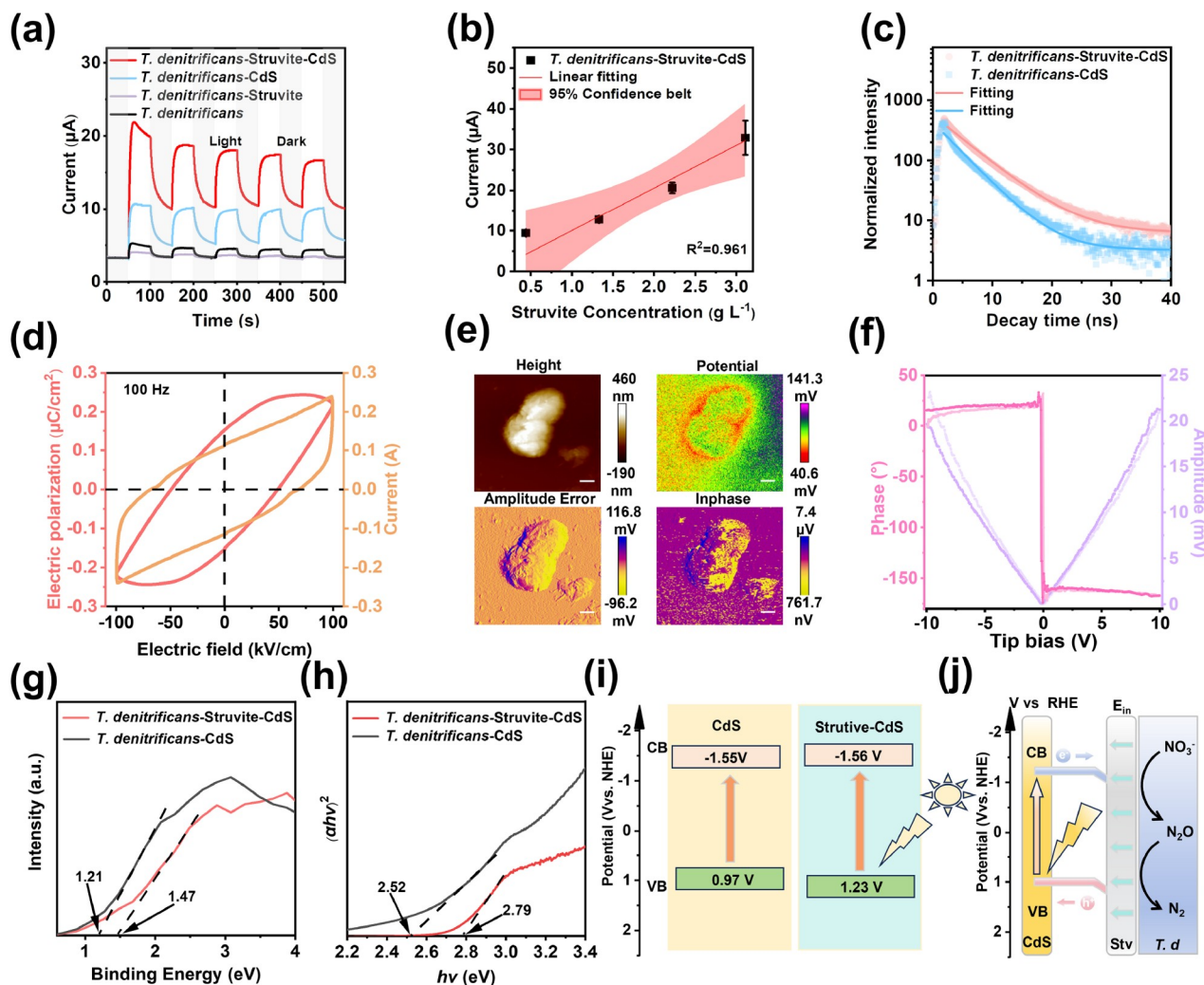


图 4 (网络版彩图)杂化体中铁电电子桥的形成机制解析. (a) 光暗交替下的 $I-t$ 曲线; (b) 不同浓度鸟粪石与光电流的相关性; (c) 光致发光光谱衰减图; (d) 杂化体的电滞回线及其 $I-V$ 曲线; (e) 杂化体的 PFM 成像图(比例尺为 200 nm); (f) 杂化体的蝴蝶曲线以及相位图; (g) XPS 价带谱图; (h) Tauc 禁带宽度计算图; (i) 能带结构图; (j) 铁电自发极化诱导的光生电子产生-转移-利用机理图, Stv: struvite, *T. d.*: *T. denitrificans*, CB: 导带, VB: 价带

Figure 4 (Color online) Analysis of the formation mechanism of ferroelectric electronic bridge in biohybrids. (a) Current-time ($I-t$) curve under alternating light and dark conditions; (b) correlation between different concentrations of ferroelectric materials (struvite) and photocurrent; (c) photoluminescence spectrum decay diagram; (d) hysteresis loop and $I-V$ curve of the hybrid structure of *T. denitrificans*-struvite-CdS; (e) PFM imaging of *T. denitrificans*-struvite-CdS, including height, surface potential, amplitude and phase diagrams (scale bar: 200 nm); (f) butterfly curve and phase inversion diagram of *T. denitrificans*-struvite-CdS; (g) XPS valence band spectrum; (h) Tauc band gap width calculation diagram; (i) band structure diagram; (j) mechanism diagram of photoelectron generation, transfer and utilization induced by ferroelectric spontaneous polarization, Stv: struvite, *T. d.*: *T. denitrificans*, CB: conduction band, VB: valence band.

线性关系($R^2 = 0.961$), 证实铁电材料鸟粪石可显著增强杂化体的光电产生与传输能力。

为进一步研究鸟粪石对杂化体的光生电子转移效率和复合率的影响, 对有/无鸟粪石的杂化体进行光致发光光谱测试(图4(c)). 采用双指数模型对荧光衰减曲线进行拟合^[36]. 其中, *T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的振幅参数 A_1 和 A_2 分别为221.395和240.037, 特征寿命 τ_1 和 τ_2 分别为2.621和6.637 ns. *T. denitrificans*-CdS杂化体的 A_1 和 A_2 分别为206.057和210.997, 特征寿命 τ_1 和 τ_2 分别为0.651和4.873 ns. 计算得出, *T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的荧光寿命为5.57 ns, 远大于*T. denitrificans*-CdS的4.38 ns, 寿命延长幅度达27.2%. 根据载流子寿命与总复合速率的反比关系, 荧光寿命的显著延长直接证实三元体系中光生载流子的总复合速率呈下降趋势^[37]. 结合稳态光致发光(photoluminescence, PL)光谱结果(图S1), 三元杂化体的PL发光强度显著高于二元杂化体, 这一现象表明*T. denitrificans*-struvite-CdS体系的辐射复合效率同步提升^[38]. 基于载流子总复合速率为辐射复合速率与非辐射复合速率的加和关系^[39], 可证明反应体系中非辐射复合得到显著抑制, 鸟粪石的引入延长光生电子在Cd的滞留时间, 进而可推断鸟粪石的添加实现了三元体系的载流子复合路径的优化, 铁电矿物(鸟粪石)的引入发挥了关键的界面桥梁作用^[40,41].

为了研究*T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的铁电性, 随后采用电滞回线测试评估杂化体的宏观铁电性能. 在 $-100 \sim 100 \text{ kV cm}^{-1}$ 的外加电场与100 Hz测试频率下, 杂化体的电滞回线呈现饱满的类矩形形状, 其最大极化强度约为 $0.2 \mu\text{C cm}^{-2}$ (图4(d)), 该杂化体的极化特性不仅能够为*T. denitrificans*的代谢过程提供有效的电子供体, 同时还可兼顾生物组分与材料组分间的界面兼容性, 在避免对微生物细胞结构造成损伤的前提下, 保障界面电子传递的高效稳定^[42]. 闭合矩形的窄幅特征则说明极化损耗低, 电荷可在界面保持稳定^[43]. 该结果与前文所述的杂化体具有较高光电流响应相呼应, 进一步证实鸟粪石在CdS和*T. denitrificans*之间搭建了一个高速“电子桥”, 提高了CdS与*T. denitrificans*间的电子分离与电子传递效率。

为进一步研究*T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的微观铁电特性, 本研究采用压电原子力显微镜对其进行表征. 形貌图清晰呈现出杂化体的三维结构

(图4(e)), 表面电势图显示杂化体表面电势高于周围背景值, 表明其界面电子转移势垒低, 有利于光生电子的定向转移^[44]. 振幅图中显示了典型的蝶形曲线, 振幅在零偏压时降至最小值, 并在正负偏压下对称恢复(图4(f)), 说明杂化体内部具有较高的铁电自发极化强度, 从而有利于光生电子-空穴对的有效分离. 并推动电子从CdS的高势能区向菌体的低势能区快速迁移, 降低与空穴的复合概率^[45]. 相位图进一步体现杂化体显示出明显的铁电畴结构(图4(e)), 其相位信号在零偏压附近发生显著反转(图4(f)), 表明杂化体具备可翻转的极化特性, 界面电荷转移势垒低^[46], CdS中的光生电子可快速响应鸟粪石的铁电电场变化, 实现高效的跨界面电子转移。

为深入解析铁电材料对杂化体系光电行为的调控机制, 本研究进一步对其能带结构进行分析. 基于XPS价带谱与紫外可见漫反射光谱(diffuse reflection spectrum, DRS)的测试结果, 对*T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体系的能带结构进行计算与比较. 将三元杂化体离心后取沉淀, 冷冻干燥后的粉末经由Thermo Scientific K-Alpha的X射线光电子能谱仪在全谱通能150 eV, 工作电压12 kV, 灯丝电流6 mA, 光斑大小400 μm , 仪器功函数4.2 eV条件下测得XPS价带谱(图4(g)), *T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的价带顶(valence-band maximum, VBM)结合能为1.47 eV, 相较于*T. denitrificans*-CdS(1.21 eV)向高结合能方向偏移了0.26 eV, 表明鸟粪石通过界面作用调控了CdS的能带结构, 增强了体系的氧化能力, 有助于提升光生载流子的分离与转移效率^[47]. 进一步将杂化完成后的三元杂化体和二元杂化体取溶液, 在UV-Vis DRS的扫描波长200~800 nm, 参比为纯水的条件下测试杂化体光吸收特性并进行Tauc计算, 得到*T. denitrificans*-CdS的禁带宽度约为2.52 eV(图4(h)), 与文献的结果一致^[11]. 而*T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体的禁带宽度扩大至约2.79 eV, 有利于增强光生电子的分离^[48]. 基于公式 $E_{\text{NHE}} = \Phi - 4.44 + E_{\text{VB}}$ (其中 E_{NHE} 为标准氢电极电位, Φ 为XPS分析仪的电子功函数(4.2 eV), E_{VB} 为价带电位)^[49]及 $E_{\text{CB}} = E_{\text{VB}} - E_{\text{g}}$ (E_{g} 表示能带宽度)^[50], 构建出杂化体的能带结构示意图(图4(i)). 反应3天后, *T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体系的产氧浓度达到 $1.29 \mu\text{g L}^{-1}$, 显著高于无鸟粪石的*T. denitrificans*-CdS体系($0.18 \mu\text{g L}^{-1}$)(图S6). 结果表明, 鸟粪石的引入优化了杂化体的能带

结构,在增强光生载流子的氧化还原性的同时,也有效抑制了电子-空穴对的复合.基于上述结果,本研究提出铁电自发极化驱动光敏半导体微生物界面电子高效传递机制(图4(j)):鸟粪石通过其自发极化特性形成持续的内建电场,在CdS与*T. denitrificans*之间构建起可高效传递电子的“电子桥”,诱导光敏半导体光生电子快速且高效地转移至微生物的跨膜电子传递蛋白上(如细胞色素*c*和蛋白纳米线等)^[51,52],这些电子随后被微生物体内电子传递链捕获和转化,最终驱动反硝化过程的进行.

4 结论

综上所述,本研究成功构建了*T. denitrificans*-struvite-CdS杂化体系,并通过多维度表征分析揭示

其高效反硝化的核心机制.形貌和结构分析证实鸟粪石已成功嵌入到杂化体中;光电和铁电性能表征分析证实鸟粪石的引入提升了光生电子的产生与传递能力;反硝化性能测试和转录组学分析则进一步验证了鸟粪石的铁电自发极化效应提升了生物电子传递效率与反硝化性能.其核心机制是鸟粪石作为天然的铁电材料,具有优异的自发极化特性,可在CdS与*T. denitrificans*之间构筑一个自发极化电场,即铁电电子桥,该铁电电子桥可以诱导光生电子快速且高效地从CdS表面转移至*T. denitrificans*表面.随后,*T. denitrificans*可通过其自身丰富的跨膜电子传递蛋白捕获、摄入和利用这些光生电子,进而驱动高效反硝化进程.该过程实现了光能到化学能的高效转化,为环境污染的生物光电化学处理提供了新的突破口和技术指导.

补充材料

本文的补充材料见网络版techcn.scichina.com.补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责.

参考文献

- Romanelli A, Soto D X, Matiatos I, et al. A biological and nitrate isotopic assessment framework to understand eutrophication in aquatic ecosystems. *Sci Total Environ*, 2020, 715: 136909
- Zhao H, Yuan M, Strokal M, et al. Impacts of nitrogen pollution on corals in the context of global climate change and potential strategies to conserve coral reefs. *Sci Total Environ*, 2021, 774: 145017
- Dan Q, Wang T, Li J, et al. Enhanced anammox performance under lower nitrite accumulation in modified partial nitrification-anammox (PN/A) process. *Bioresour Tech*, 2024, 406: 131018
- Li H, Yao H, Liu T, et al. Achieving simultaneous nitrogen and antibiotic removal in one-stage partial nitrification-Anammox (PN/A) process. *Environ Int*, 2020, 143: 105987
- Pang Y, Wang J. Various electron donors for biological nitrate removal: A review. *Sci Total Environ*, 2021, 794: 148699
- Yang E, Chen J, Liu K, et al. Intensifying single-stage denitrogen by a dissolved oxygen-differentiated airlift internal circulation reactor under organic matter stress: Nitrogen removal pathways and microbial interactions. *Water Res*, 2023, 241: 120120
- Chen F, Li Z, Ye Y, et al. Coupled sulfur and electrode-driven autotrophic denitrification for significantly enhanced nitrate removal. *Water Res*, 2022, 220: 118675
- Li H, Han J, Li Z, et al. Significantly enhanced nitrate removal by nanoscale zerovalent iron-reduced graphene oxide composites via biological denitrification: Performance and mechanism. *ACS EST Water*, 2024, 4: 5543–5554
- Hu J, Chen M, Gu W Z, et al. Biophotocatalysis for the treatment of emerging contaminants. *Sci China Tech Sci*, 2024, 67: 3051–3066
- Hu A, Li B, Yang S, et al. Unlocking interfacial electron transfer in biophotocatalytic processes: Role of extracellular polymeric substances in aquatic environments. *Water Res*, 2025, 278: 123375
- Chen X, Feng Q, Cai Q, et al. Mn₃O₄ nanzyme coating accelerates nitrate reduction and decreases N₂O emission during photoelectrotrophic denitrification by *Thiobacillus denitrificans*-CdS. *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 10820–10830
- Yang L, Nandakumar D K, Miao L, et al. Energy harvesting from atmospheric humidity by a hydrogel-integrated ferroelectric-semiconductor system. *Joule*, 2020, 4: 176–188

- 13 Liu Z, Yu X, Li L. Piezopotential augmented photo- and photoelectro-catalysis with a built-in electric field. *Chin J Catal*, 2020, 41: 534–549
- 14 Prywer J, Kruszyński R, Świątkowski M, et al. First experimental evidence of the piezoelectric nature of struvite. *Sci Rep*, 2021, 11: 14860
- 15 Chen M, Zhou X F, Yu Y Q, et al. Light-driven nitrous oxide production via autotrophic denitrification by self-photosensitized *Thiobacillus denitrificans*. *Environ Int*, 2019, 127: 353–360
- 16 Zhang Y Y, Ren G P, Hu A D, et al. Visible light-driven *Methanosarcina barkeri*-natural carbon-based semiconductor for methane production (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2021, 51: 601–612 [张艺韞, 任国平, 胡安东, 等. 可见光驱动 *Methanosarcina barkeri*-天然碳基半导体产甲烷性能及机制. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 601–612]
- 17 Hong M Q, Ren G P, Hu Q C, et al. Rapid room-temperature preparation and hydrovoltaic application of biohydrogel (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2025, 55: 104–114 [洪铭秋, 任国平, 胡启昌, 等. 生物凝胶膜的室温快速聚合及其水发电功效. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 104–114]
- 18 Hong M Q, Ren G P, Hu Q C, et al. Bioinspired capillary origami design for minimalist hydrovoltaic power generation (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2024, 54: 1347–1356 [洪铭秋, 任国平, 胡启昌, 等. 基于仿生毛细管折纸设计的极简水发电. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1347–1356]
- 19 Ren G, Ye J, Hu Q, et al. Growth of electroautotrophic microorganisms using hydrovoltaic energy through natural water evaporation. *Nat Commun*, 2024, 15: 4992
- 20 Ko Y K, Yabushita A, Kobayashi T. Primary electronic and vibrational dynamics of cytochrome *c* observed by sub-10 fs NUV laser pulses. *J Phys Chem B*, 2020, 124: 8249–8258
- 21 Ye J, Wang C, Gao C, et al. Solar-driven methanogenesis with ultrahigh selectivity by turning down H₂ production at biotic-abiotic interface. *Nat Commun*, 2022, 13: 6612
- 22 Touach N, Benzaouak A, Toyir J, et al. BaTiO₃ functional perovskite as photocathode in microbial fuel cells for energy production and wastewater treatment. *Molecules*, 2023, 28: 1894
- 23 Cui Y, Briscoe J, Dunn S. Effect of ferroelectricity on solar-light-driven photocatalytic activity of BaTiO₃—Influence on the carrier separation and stern layer formation. *Chem Mater*, 2013, 25: 4215–4223
- 24 Zhao T L, Li H, Jiang H F, et al. Morphogenesis and evolution mechanisms of bacterially-induced struvite. *Sci Rep*, 2021, 11: 170
- 25 Wei L, Hong T, Li X, et al. New insights into the adsorption behavior and mechanism of alginic acid onto struvite crystals. *Chem Eng J*, 2019, 358: 1074–1082
- 26 Wang Y, Wang X, Li J, et al. Coadsorption of tetracycline and copper(II) onto struvite loaded zeolite—An environmentally friendly product recovered from swine biogas slurry. *Chem Eng J*, 2019, 371: 366–377
- 27 Kirinovic E, Leichtfuss A R, Navizaga C, et al. Spectroscopic and microscopic identification of the reaction products and intermediates during the struvite (MgNH₄PO₄·6H₂O) formation from magnesium oxide (MgO) and magnesium carbonate (MgCO₃) microparticles. *ACS Sustain Chem Eng*, 2017, 5: 1567–1577
- 28 Chen M, Dong H, Xue M, et al. Faradaic junction and isoenergetic charge transfer mechanism on semiconductor/semiconductor interfaces. *Nat Commun*, 2021, 12: 6363
- 29 Vale B R C, Mourão R S, Bettini J, et al. Ligand induced switching of the band alignment in aqueous synthesized CdTe/CdS core/shell nanocrystals. *Sci Rep*, 2019, 9: 8332
- 30 Du Y, Li Y, Li Y, et al. Ultrafast electron transfer kinetics at semiconductor-microbe interface: Key to efficient extracellular photoelectron utilization. *Appl Environ Microbiol*, 2025, 91: e00138-25
- 31 Guo M, Liu G, Qiao S, et al. Bacteria-photocatalyst biohybrid system for sustainable ammonium production. *Engineering*, 2025, 50: 52–59
- 32 Li Y, Zhou H, Cai S, et al. Electrolyte-assisted polarization leading to enhanced charge separation and solar-to-hydrogen conversion efficiency of seawater splitting. *Nat Catal*, 2024, 7: 77–88
- 33 Shen R, Ding Y, Li S, et al. Constructing low-cost Ni₃C/twin-crystal Zn_{0.5}Cd_{0.5}S heterojunction/homojunction nanohybrids for efficient photocatalytic H₂ evolution. *Chin J Catal*, 2021, 42: 25–36
- 34 Prywer J, Delmonte D, Solzi M, et al. First experimental evidences of the ferroelectric nature of struvite. *Cryst Growth Des*, 2020, 20: 4454–4460
- 35 Ren G, Ye J, Liu L, et al. Mechanical energy drives the growth and carbon fixation of electroactive microorganisms. *Engineering*, 2025, 47: 194–203
- 36 Hu Q, Ren G, Ye J, et al. Hygroelectric-photovoltaic coupling generator using self-assembled bio-nano hybrids. *Chem Eng J*, 2023, 452: 139169
- 37 Zeng Y, Lu D, Kondamareddy K K, et al. Enhanced visible light photocatalysis and mechanism insight for novel Z-scheme MoS₂/Ag₂S/AgVO_x

- ternary heterostructure with fast interfacial charges transfer. *J Alloys Compd*, 2022, 908: 164642
- 38 Lung Q N D, Chu R J, Kim Y, et al. Graphene/III-V quantum dot mixed-dimensional heterostructure for enhanced radiative recombinations via hole carrier transfer. *Nano Lett*, 2023, 23: 3344–3351
- 39 Zhang F, Castaneda J F, Gfroerer T H, et al. An all optical approach for comprehensive in-operando analysis of radiative and nonradiative recombination processes in GaAs double heterostructures. *Light Sci Appl*, 2022, 11: 137
- 40 James D R, Liu Y S, De Mayo P, et al. Distributions of fluorescence lifetimes: Consequences for the photophysics of molecules adsorbed on surfaces. *Chem Phys Lett*, 1985, 120: 460–465
- 41 Vokhmintcev K V, Samokhvalov P S, Nabiev I. Charge transfer and separation in photoexcited quantum dot-based systems. *Nano Today*, 2016, 11: 189–211
- 42 Ye J, Ren G, Liu L, et al. Wastewater denitrification driven by mechanical energy through cellular piezo-sensitization. *Nat Water*, 2024, 2: 531–540
- 43 Sun Y, Zhang L, Huang Q, et al. Ultrahigh energy storage density in glassy ferroelectric thin films under low electric field. *Adv Sci*, 2022, 9: 2203926
- 44 Liu L, Huang H. Ferroelectrics in photocatalysis. *Chem Eur J*, 2022, 28: e202103975
- 45 Jiang Z, Xiao Z, Tao Z, et al. A significant enhancement of bulk charge separation in photoelectrocatalysis by ferroelectric polarization induced in CdS/BaTiO₃ nanowires. *RSC Adv*, 2021, 11: 26534–26545
- 46 Bai Y, Yu Z, Guan Z, et al. Sub-nanosecond polarization switching with anomalous kinetics in vdW ferroelectric WTe₂. *Nat Commun*, 2025, 16: 7221
- 47 Marshall R. Semiconductor composites: Strategies for enhancing charge carrier separation to improve photocatalytic activity. *Adv Funct Mater*, 2014, 24: 2421–2440
- 48 Qiao T, Son D H. Synthesis and properties of strongly quantum-confined cesium lead halide perovskite nanocrystals. *Acc Chem Res*, 2021, 54: 1399–1408
- 49 Yu H, Shi R, Zhao Y, et al. Alkali-assisted synthesis of nitrogen deficient graphitic carbon nitride with tunable band structures for efficient visible-light-driven hydrogen evolution. *Adv Mater*, 2017, 29: 1605148
- 50 Ren G, Hu Q, Ye J, et al. All-biobased hydrovoltaic-photovoltaic electricity generators for all-weather energy harvesting. *Research*, 2022, 2022: 2022/9873203
- 51 Neu J, Shipps C C, Guberman-Pfeffer M J, et al. Microbial biofilms as living photoconductors due to ultrafast electron transfer in cytochrome OmcS nanowires. *Nat Commun*, 2022, 13: 5150
- 52 Sun W, Lin Z, Yu Q, et al. Promoting extracellular electron transfer of *Shewanella oneidensis* MR-1 by optimizing the periplasmic cytochrome *c* network. *Front Microbiol*, 2021, 12: 727709

Nano-mineral enhanced microbial photoelectric denitrification: Ferroelectric electron bridge effect

ZHANG Suo, CHEN Zhen, REN XiangXu, LIU Lu, REN GuoPing & ZHOU ShunGui

College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Photoelectric denitrification is a green and efficient technology for solving nitrate pollution in water bodies. With its advantages of low energy consumption and no pollution, it has become a research hotspot in the field of environmental governance. The efficiency of interfacial electron transfer is the key factor determining the denitrification rate, and its improvement is directly related to the application effect of the technology. However, in traditional systems, photogenerated carriers are prone to recombination, the spectral response range of sunlight is narrow, and the energy conversion path is single, which makes it difficult to efficiently convert light energy into chemical energy and seriously restricts the improvement of denitrification performance. To address this issue, this study aims to utilize the spontaneous polarization characteristics of ferroelectrics to construct an efficient and directional electron bridge between photosensitive semiconductors and microorganisms, thereby enhancing the capture and transfer efficiency of photoelectrons. Here, *Thiobacillus denitrificans* (*T. denitrificans*) was used as the model microorganism to construct a *T. denitrificans*-struvite-CdS hybrid system. In this system, struvite, as a natural ferroelectric material, builds a spontaneous polarization electric field between CdS and *T. denitrificans*. This electric field not only rapidly and efficiently captures the photogenerated electrons on the surface of CdS and inhibits carrier recombination but also transfers electrons to *T. denitrificans* through directional polarization, allowing it to capture, intake and utilize them with the help of its abundant transmembrane electron transfer proteins, thereby achieving efficient denitrification and the efficient conversion of light energy to chemical energy. In summary, this study proposes a new strategy of interfacial electron transfer mediated by the polarization electric field of ferroelectric materials, successfully constructs an efficient and directional electron channel, and provides new ideas and technical options for the biological photoelectrochemical treatment of environmental pollution.

ferroelectric materials, photogenerated carrier separation, electron transfer channel, wastewater denitrification

doi: [10.1360/SST-2025-0401](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0401)